

## Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Aus dem Stand der Technik sind zahlreiche Verfahren zur Beschichtung von Werkstücken bekannt. Beim sogenannten thermischen Spritzen handelt es sich um ein Beschichtungsverfahren, bei welchem ein thermisch aktiver Werkstoff geschmolzen und sodann auf zum Beispiel eine zu beschichtende Oberfläche des Werkstücks gespritzt bzw. gesprüht wird. Da nahezu alle schmelzbaren Werkstoffe verwendet werden können, lassen sich durch thermisches Spritzen Beschichtungen mit unterschiedlichen Eigenschaften bzw. Funktionen wie zum Beispiel Wärmedämmung, Korrosionsschutz oder Verschleißschutz realisieren. Beim thermischen Spritzen gibt es nahezu unbegrenzte Kombinationsmöglichkeiten zwischen dem Werkstoff des zu beschichtenden Gegenstands und dem für die Beschichtung zu verwendenden, thermisch aktiven Werkstoff. Abhängig von der verwendeten Wärmequelle unterscheidet man verschiedene thermischen Spritzverfahren, nämlich zum Beispiel das Plasmaspritzen, Lichtbogenspritzen, Flamspritzen oder auch Hochgeschwindigkeitsflamspritzen. Die Auswahl einer geeigneten Wärmequelle und damit die Auswahl des entsprechenden thermischen Spritzverfahrens hängt zum Beispiel vom für die Beschichtung zu verwendenden Werkstoff, den gewünschten Eigenschaften der Beschichtung und von den jeweiligen Kosten ab.

Bei der Beschichtung von Schaufeln einer Gasturbine, die vorzugsweise aus Titan/Nickel-Legierungen bestehen, kommt als thermisch aktiver Werkstoff für die Beschichtung bevorzugt ein thermisches Sprühpulver gemäß EP 0 487 273 B1 zum Einsatz. Ein solches Sprühpulver gemäß EP 0 487 273 B1 wird vorzugsweise durch Plasmaspritzen auf das zu beschichtende Werkstück aufgebracht, wobei ein geeignetes Plasmatron zum Beispiel in der EP 0 851 720 B1 gezeigt ist.

Bei der Beschichtung von Werkstücken mit einem thermischen Spritzverfahren kommt der Qualitätskontrolle der sich einstellenden Beschichtung eine wichtige Rolle zu. Nur dann, wenn die Beschichtung vorgegebene Qualitätskriterien erfüllt, kann das beschichtete Werkstück die Qualitätskontrolle passieren und gegebenenfalls weiterverarbeitet werden. Nach dem Stand der Technik werden zur Qualitätskontrolle zerstörende Prüfmethoden stichprobenartig eingesetzt. Eine das Werkstück zerstörende Qualitätskontrolle

ist zum einen kosten- und zeitintensiv, zum anderen können nur stichprobenartige Kontrollen durchgeführt werden.

Hiervon ausgehend liegt der vorliegenden Erfindung das Problem zu Grunde ein neuartiges Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks zu schaffen.

Dieses Problem wird durch ein Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks gemäß Patentanspruch 1 gelöst. Erfindungsgemäß wird der Spritzvorgang online überwacht, indem Eigenschaften der im Spritzstrahl befindlichen Partikel erfasst und als Istwerte bereitgestellt werden, wobei die Istwerte unmittelbar oder aus den Istwerten abgeleitete Kenngrößen mit Sollwerten verglichen werden, und wobei bei Abweichung der Istwerte oder Kenngrößen von den vorgegebenen Sollwerten Prozessparameter für das thermische Spritzen durch einen Regler auf Basis eines neuronalen Netzwerks automatisch angepasst werden.

Mithilfe der hier vorliegenden Erfindung lässt sich das thermische Spritzen online überwachen, des weiteren sind Prozessparameter für das thermische Spritzen automatisch anpassbar. Dies erlaubt den Aufbau eines Online-Regelungssystems für das thermische Spritzen, welches die aus dem Stand der Technik bekannten, zerstörenden Prüfmethoden überflüssig macht. Durch das erfindungsgemäße Verfahren werden fehlerhafte Beschichtungen und aufwendige Prüfverfahren vermieden. Bedingt dadurch, dass ein automatisierter Beschichtungsvorgang bereitgestellt wird, werden durch manuelle Fehleinstellungen verursachte Fehler vermieden.

Nach einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung wird ein Neuro-Fuzzy-Regler verwendet, der mindestens ein neuronales Netzwerk und Fuzzy-Logik-Regeln miteinander kombiniert und so statistische Zusammenhänge zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen des Neuro-Fuzzy-Reglers abbildet.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung. Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird, ohne hierauf beschränkt zu sein, an Hand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt:

Fig. 1 eine stark schematisierte Darstellung einer Vorrichtung zur Beschichtung eines Werkstücks zur Verdeutlichung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 2 die Struktur eines beim erfindungsgemäßen Verfahren verwendeten neuronalen Netzwerks; und

Fig. 3 die Struktur eines beim erfindungsgemäßen Verfahren verwendeten Neuro-Fuzzy-Reglers.

Nachfolgend wird die hier vorliegende Erfindung unter Bezugnahme auf Fig. 1 bis 3 in größerem Detail beschrieben.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Beschichten eines Werkstücks mittels thermischem Spritzen. Beim thermischen Spritzen wird ein schmelzbarer Werkstoff geschmolzen und in geschmolzener Form auf ein zu beschichtendes Werkstück gespritzt bzw. gesprüht. Wenn nachfolgend die Erfindung beispielhaft für das sogenannte Plasmaspritzen beschrieben wird, so soll die Erfindung jedoch nicht auf das Plasmaspritzen beschränkt sein. Vielmehr kann die Erfindung auch bei allen anderen thermischen Spritzverfahren zum Einsatz kommen. Die Erfindung lässt sich jedoch besonders vorteilhaft beim Plasmaspritzen verwenden.

Das Plasmaspritzen als solches ist aus dem Stand der Technik hinlänglich bekannt. So offenbart zum Beispiel die EP 0 851 720 B1 ein für das Plasmaspritzen geeignetes Plasmatron. Die EP 0 487 273 B1 offenbart ein thermisches Sprühpulver, welches als Werkstoff zum Beschichten eines Werkstücks geeignet ist. Der Vollständigkeit halber soll lediglich angemerkt werden, dass beim Plasmaspritzen zwischen einer Kathode und einer Anode eines nicht-dargestellten Plasmatrons ein Lichtbogen gezündet wird. Dieser Lichtbogen erhitzt ein durch das Plasmatron strömendes Plasmagas. Als Plasmagase werden zum Beispiel Argon, Wasserstoff, Stickstoff, Helium oder Gemische dieser Gase verwendet. Durch das Erhitzen des Plasmagases stellt sich ein Plasmastrahl ein, der im Kern Temperaturen von bis 20.000°C erreichen kann. Der zur Beschichtung verwendete Werkstoff, zum Beispiel das aus der EP 0 487 273 bekannte thermische Sprühpulver, wird mithilfe eines Trägergases in den Plasmastrahl injiziert und dort geschmolzen. Des weiteren wird dieser für die Beschichtung zu verwendende Werkstoff durch den Plasmastrahl auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt. Der auf diese Art und Weise geschmolzene sowie beschleunigte Werkstoff wird auf das zu beschichtende Werkstück aufgetragen, nämlich aufgespritzt. Hierbei bildet sich ein Spritzstrahl aus, wobei der Spritzstrahl zum einen von dem Plasmastrahl und zum anderen von dem Partikelstrahl des geschmolzenen Werkstoff gebildet wird. Die Partikel des Werkstoffs prallen mit einer hohen thermischen sowie kinetischen Energie auf eine Oberfläche des zu beschichtenden Werkstücks auf und bilden dort eine Beschichtung. Abhängig von den Parametern des Spritzprozesses bilden sich die gewünschten Eigenschaften der Beschichtung aus.

Der Beschichtungsvorgang ist, wie bereits erwähnt, von verschiedenen Parametern des Beschichtungsvorgangs abhängig. Obwohl thermische Spritzprozesse, wie zum Beispiel Plasmaspritzen, bereits gut erforscht sind, unterliegen die Eigenschaften der sich einstellenden Beschichtungen selbst bei scheinbar konstanten Parametern des Beschichtungsprozesses großen Streuungen. Hierfür sind die komplexen Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den Eigenschaften der sich ausbildenden Beschichtung verantwortlich. Der Beschichtungsprozess ist daher gegenüber Schwankungen des Beschichtungsvorgangs äußerst empfindlich.

Es liegt nun im Sinne der Erfindung, den Spritzvorgang zu überwachen, auszuwerten und die Prozessparameter für das Plasmaspritzen durch einen Regler automatisch anzupassen, wobei der Regler zumindest ein neuronales Netzwerk umfasst.

Die Überwachung und Auswertung des Spritzvorgangs erfolgt online. Die Überwachung und Auswertung des Spritzvorgangs wird nachfolgend unter Bezugnahme auf Fig. 1 erläutert. Fig. 1 zeigt stark schematisiert einen sich beim Plasmaspritzen einstellenden Spritzstrahl 10. Der Spritzstrahl 10 wird mit einer Kamera 11 optisch überwacht, die im gezeigten Ausführungsbeispiel als CCD-Kamera ausgebildet ist. Das von der Kamera 11 erfasste bzw. ermittelte Bild wird einem im Detail nicht-dargestellten Bildverarbeitungssystem zugeführt. Im Bildverarbeitungssystem werden Eigenschaften des optisch überwachten Spritzstrahls aus den von der Kamera 11 erfassten Daten ermittelt.

So zeigt Fig. 1 ein Auswertemuster 12 zur Auswertung der von der Kamera 11 erfassten Daten des Spritzstrahls 10. So kann Fig. 1 entnommen werden, dass von der Kamera 11 sowohl Eigenschaften eines Plasmastrahls 13 als auch Eigenschaften eines Partikelstrahls 14 erfasst werden. Im gezeigten Ausführungsbeispiel ermittelt die Kamera 11 eine Leuchtdichteverteilung des Plasmastrahls 13 sowie eine Leuchtdichteverteilung des Partikelstrahls 14. Aus diesen Leuchtdichteverteilungen werden im Bildverarbeitungssystem Höhenlinien mit gleicher Leuchtintensität ermittelt. In solche Höhenlinien mit gleicher Leuchtintensität werden gemäß Fig. 1 Ellipsen 15 eingeschrieben. Dies erfolgt sowohl für den Plasmastrahl 13 als auch für den Partikelstrahl 14. Die in die Höhenlinien eingeschriebenen Ellipsen 15 verfügen über charakteristische geometrische Kenngrößen. Bei diesen geometrischen Kenngrößen der Ellipsen 15 handelt es sich um Halbachsen  $a$  sowie  $b$  um den Schwerpunkt der Ellipsen, der in Fig. 1 durch die Koordinaten  $S_x$  sowie  $S_y$  identifiziert werden kann. Aus diesen charakteristischen Daten der Ellipsen 15 lässt sich eindeutig auf die Eigenschaf-

ten des Spritzstrahls und letztendlich auf die Eigenschaften der sich beim Spritzvorgang einstellenden Beschichtung schließen. Es soll darauf hingewiesen werden, dass auch andere Eigenschaften des Spritzstrahls optisch erfasst und ausgewertet werden können. So kann anstelle oder zusätzlich zu der Leuchtdichtevertelung auch eine Partikeltemperatur und/oder Partikelgeschwindigkeit und/oder Partikelgröße des Spritzstrahls überwacht werden. Auch aus diesen Eigenschaften kann auf die Eigenschaften der sich einstellenden Beschichtung geschlossen werden.

Die aus der optischen Überwachung des Spritzstrahls ermittelten, geometrischen Kenngrößen der Ellipsen 15, die den Eigenschaften des Spritzstrahls 10 entsprechen, werden mit vorgegebenen Sollwerten für diese Eigenschaften bzw. vorgegebenen Ellipsenkenngößen verglichen. Wird eine Abweichung der ermittelten Eigenschaften (Istwerte) des Spritzstrahls von den vorbestimmten Werten (Sollwerten) für die Eigenschaften erkannt, so erfolgt eine automatische Anpassung der Prozessparameter für das Plasmaspritzen durch einen Neuro-Regler bzw. ein neuronales Netzwerk.

Wie bereits erwähnt, basiert der Regler zur Durchführung des erfindungsgemäßen Beschichtungsverfahrens auf einem neuronalen Netzwerk. Fig. 2 zeigt als Beispiel ein derartiges neuronales Netzwerk 16, welches aus zwei Lagen 17 bzw. 18 von Neuronen 19 bzw. 20 besteht. Bei dem neuronalen Netzwerk 16 gemäß Fig. 2 handelt es sich um ein sogenanntes vorwärtsgerichtetes neuronales Netzwerk.

Jedes Neuron 19 bzw. 20 der beiden Lagen 17 bzw. 18 des neuronalen Netzwerks 16 der Fig. 2 verfügt über ein Eingangssignal  $a_{j^{l-1}}$  und ein Ausgangssignal  $a_i^l$ , wobei eine Verknüpfung über Gewichte  $w_{i,j}^l$  und einen Bias  $b_i^l$  erfolgt. Wie Fig. 2 entnommen werden kann, verfügen die Neuronen 19 der ersten Lage 17 über eine nicht-lineare bzw. sigmoide Übertragungsfunktion, die Neuronen 20 der zweiten Lage 18 hingegen verfügen über eine lineare Übertragungsfunktion.

Zum Training des in Fig. 2 gezeigten neuronalen Netzwerks 16 wird der sogenannte Backpropagation-Algorithmus benutzt. Ein Ausgangsvektor für die l-te Lage des neuronalen Netzwerks 16 wird dabei aus den Eingangssignalen unter Verwendung der Übertragungsfunktion, aus der Gewichtungsmatrix und dem Biasvektor berechnet. Dabei gilt:

$$a_i^l = f \left( \sum_{j=1}^{n^{l-1}} w_{i,j}^l a_j^{l-1} + b_i^l \right)$$

Um nun  $a_i^1$  zu berechnen, ist es zuerst notwendig, die unbekannten Gewichte sowie den unbekannten Bias zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird das Netzwerk mit einer Vielzahl von Datensätzen trainiert, die Eingangsdaten  $x_i$  umfassen, zum Beispiel:

$$a_i^0 = x_i$$

und weiterhin gewünschte Ausgangsdaten  $d_k$  umfassen. Zu Beginn des Trainings werden die Gewichte sowie der Bias auf zufällige Werte gesetzt. Um deren aktuelle Werte endgültig zu bestimmen, sind viele Iterationen notwendig, um folgende Fehlerfunktion zu minimieren.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n^2} (d_k - a_k^2)^2$$

Nach dem Backpropagation-Algorithmus folgt die Erneuerung der Gewichte sowie des Bias dem abfallenden Gradienten der Fehlerfunktion, wobei gilt:

$$\Delta w_{i,j}^l = -\frac{\partial E}{\partial w_{i,j}^l}; \quad \Delta b_i^l = -\frac{\partial E}{\partial b_i^l}$$

Die Verwendung der nachfolgend wiedergegebenen, sigmoid-ähnlichen Übertragungsfunktion

$$f(\sigma) = \frac{1}{1 + e^{-\sigma}} \quad \text{wobei} \quad \sigma = \sum_{j=1}^{n^{l-1}} w_{i,j}^l a_j^{l-1} + b_i^l$$

in Verbindung mit der Anpassung der nachfolgenden Abkürzung

$$\delta_k^2 = a_k^2 (d_k - a_k^2) (1 - a_k^2)$$

$$\delta_j^l = a_j^2 (1 - a_j^2) \sum_{k=1}^{n^l} w_{j,k}^2 \delta_k^2$$

und die Einführung einer sogenannten Lernrate  $\lambda$  resultiert letztendlich in der nachfolgenden Beziehung zur Bestimmung der Gewichte und des Bias im Lernschritt  $k$ :

$$w'_{i,j}(k) = w'_{i,j}(k-1) - \lambda a_j^{l-1} \delta'_j$$

$$b'_i(k) = b'_i(k-1) + \lambda \delta'_j$$

Es sei darauf hingewiesen, dass es eine Vielzahl von Varianten des Backpropagation-Algorithmus gibt, die sich im Wesentlichen durch die Konvergenzkriterien unterscheiden.

Mit einem derartigen neuronalen Netzwerk 16 ist eine Beziehung zwischen den Prozessparametern für das thermische Spitzen sowie der erforderlichen Beschichtungseigenschaften etablierbar. Bei einem derartigen neuronalen Netzwerk handelt es sich um ein adaptives, fehlertolerantes sowie lernendes System. Die Verwendung eines derartigen neuronalen Netzwerks in einem Regler für das Beschichtungsverfahren erlaubt eine besonders gute Prozesskontrolle.

Wie bereits erwähnt, sind neuronale Netzwerke adaptive Systeme, welchen Muster von Datenmengen angelernt werden können. Die neuronalen Netzwerke sind damit in der Lage, in unbekannten Datenmengen die angelernten Muster zu erkennen, wobei Extrapolationen und Interpolationen möglich sind. Das neuronale Netzwerk kann dabei jedoch nur solche Muster erkennen, die präzise den angelernten Mustern entsprechen.

Im Ausführungsbeispiel der Fig. 2 umfasst das neuronale Netzwerk lediglich zwei Lagen von Neuronen. Es ist jedoch möglich, ein neuronales Netzwerk mit einer höheren Anzahl von Lagen zu verwenden. So arbeitet zum Beispiel ein Neuro-Fuzzy-Regler, der ein neuronales Netzwerk und Fuzzy-Logik-Regeln miteinander kombiniert, mit einer höheren Anzahl von Lagen. Dies wird nachfolgend unter Bezugnahme auf Fig. 3 erläutert.

Fig. 3 zeigt die Struktur eines nach einer bevorzugten Weiterbildung der hier vorliegenden Erfindung verwendeten Neuro-Fuzzy-Reglers 29, der im Beispiel der Fig. 3 insgesamt vier Lagen von Neuronen ausweist, nämlich eine erste Lage 21 mit Neuronen 22, eine zweite Lage 23 mit Neuronen 24, eine dritte Lage 25 mit Neuronen 26 und eine vierte Lage 27 mit Neuronen 28.

Die Neuronen 22 der ersten Lage 21 bilden eine Eingangslage des Neuro-Fuzzy-Reglers 29 und dienen der Realisierung der sogenannten Fuzzifizierung. Die Neuronen 28 der vierten Lage 27 bilden eine Ausgangslage des Neuro-Fuzzy-Reglers 29 und dienen der Realisierung der sogenannten Defuzzifizierung. Die Neuronen 24 der zweiten Lage 23 und die Neuronen 26 der

drritten Lage 25 bilden Zwischenlagen (hidden layers) des Neuro-Fuzzy-Reglers 29 und dienen der Realisierung der sogenannten Fuzzy-Inferenz.

Bei der Fuzzifizierung in der ersten Lage 21 des Neuro-Fuzzy-Reglers 29 werden die Eingangsgrößen  $a_1, a_2$  bis  $a_{na}$  des Neuro-Fuzzy-Reglers 29 in von der Fuzzy-Inferenz verarbeitbare Fuzzy-Variablen gewandelt. Bei den Eingangsgrößen  $a_1, a_2$  bis  $a_{na}$  handelt es sich um sogenannte scharfe Eingangsgrößen, die mit Hilfe der Fuzzifizierung in unscharfe Fuzzy-Eingangs-Variablen  $m_{1,k}^a, \alpha_{1,k}^a$  und  $\beta_{1,k}^a$  gewandelt werden. Die unscharfen Fuzzy-Eingangs-Variablen werden der Fuzzy-Inferenz, nämlich der zweiten Lage 23, als Eingangsgrößen zugeführt. In der Fuzzy-Inferenz werden diese Fuzzy-Eingangs-Variablen über linguistische Regeln und Fuzzy-Operatoren, insbesondere über Minimum-Operatoren  $g_1, g_2, g_3$  bis  $g_{ng}$  und/oder Maximum-Operatoren  $h_1, h_2$  bis  $h_{nh}$ , verarbeitet, wobei die dritte Lage 25 als Ergebnis Fuzzy-Ausgangs-Variablen  $m_{j,i}^b, \alpha_{j,i}^b$  und  $\beta_{j,i}^b$  ausgibt. Bei den Fuzzy-Ausgangs-Variablen handelt es wieder um sogenannte unscharfe Größen. Diese unscharfen Fuzzy-Ausgangs-Variablen werden über die mit der vierten Lage 27 realisierte Defuzzifizierung in scharfe Ausgangsgrößen  $b_1$  bis  $b_{nb}$  des Neuro-Fuzzy-Reglers 29 gewandelt.

Bei einem derartigen Neuro-Fuzzy-Regler 29 wird dem neuronalen Netzwerk der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen  $a_1, a_2$  bis  $a_{na}$  und den Ausgangsgrößen  $b_1$  bis  $b_{nb}$  vor dem Lernen in Form von linguistischen Fuzzyregeln vorgegeben. Bei dem neuronalen Netzwerk 16 des Ausführungsbeispiels der Fig. 2 hingegen ist der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und den Ausgangsgrößen unbekannt und wird vom neuronalen Netzwerk 16 selbstständig erstellt bzw. erlernt. Das neuronale Netzwerk 16 des Ausführungsbeispiels der Fig. 2 ist sozusagen eine Black-Box. Dies wird beim Neuro-Fuzzy-Regler 29 des Ausführungsbeispiels der Fig. 3 vermieden. Durch das Trainieren des Neuro-Fuzzy-Reglers 29 der Fig. 3 wird der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen  $a_1, a_2$  bis  $a_{na}$  und den Ausgangsgrößen  $b_1$  bis  $b_{nb}$  optimiert. Die Struktur des Neuro-Fuzzy-Regler 29 bleibt dabei jedoch erhalten, wodurch die Transparenz erhöht und eine Diagnose ermöglicht wird. Da der Neuro-Fuzzy-Regler 29 unscharfe Werte verarbeiten kann, ist derselbe fehlertoleranter als das Ausführungsbeispiel der Fig. 2.

Im Ausführungsbeispiel der Fig. 3 umfasst der Neuro-Fuzzy-Regler vier Lagen von Neuronen. Es ist jedoch möglich, einen Neuro-Fuzzy-Regler mit einer höheren Anzahl von Lagen zu verwenden. Bei einer höheren Anzahl von Lagen würde sich die Anzahl der die Fuzzy-Inferenz abbildenden, zwischen der Eingangslage und der Ausgangslage angeordneten Lagen erhöhen.



## Patentansprüche

1. Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks, wobei ein Werkstoff durch thermisches Spritzen auf das Werkstück aufgetragen wird, dadurch gekennzeichnet, dass der Spritzvorgang online überwacht wird, indem Eigenschaften der im Spritzstrahl befindlichen Partikel erfasst und als Istwerte bereitgestellt werden, dass die Istwerte unmittelbar oder aus den Istwerten abgeleitete Kenngrößen mit Sollwerten verglichen werden, und dass bei Abweichung der Istwerte oder Kenngrößen von den vorgegebenen Sollwerten Prozessparameter für das thermische Spritzen durch einen Regler auf Basis mindestens eines neuronalen Netzwerks automatisch angepasst werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei den erfassten Eigenschaften des Spritzstrahls um Partikeltemperatur und/oder Partikelgeschwindigkeit und/oder Partikelgröße und/oder Leuchtintensität der Partikel handelt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein Regler verwendet wird, der ein neuronales Netzwerk (16) aufweist, wobei das neuronale Netzwerk (16) mindestens zwei Lagen (17, 18) mit mehreren Neuronen (19, 20) aufweist, wobei die Neuronen (19) einer ersten Lage (17) nicht-lineare Übertragungsfunktionen, und wobei die Neuronen (20) einer zweiten Lage (18) lineare Übertragungsfunktionen aufweisen.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein Neuro-Fuzzy-Regler (29) verwendet wird, der mindestens ein neuronales Netzwerk und Fuzzy-Logik-Regeln miteinander kombiniert und so statistische Zusammenhänge zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen des Neuro-Fuzzy-Reglers abbildet.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet,

dass der Neuro-Fuzzy-Regler (29) ein neuronales Netzwerk aufweist, wobei das neuronale Netzwerk mindestens vier Lagen (21, 23, 25, 27) mit mehreren Neuronen (22, 24, 26, 28) umfasst, wobei die Neuronen (22) der Eingangslage (21) eine Fuzzifizierung, die Neuronen (28) der Ausgangslage (27) eine Defuzzifizierung und die Neuronen (24, 26) der zwischen der Eingangslage (21) und der Ausgangslage (27) angeordneten Lagen (23, 25) eine Fuzzy-Inferenz abbilden.

### Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Beschichtung eines Werkstücks, wobei ein Werkstoff durch thermisches Spritzen auf das Werkstück aufgetragen wird. Erfindungsgemäß wird der Spritzvorgang online überwacht, indem Eigenschaften der im Spritzstrahl befindlichen Partikel erfasst und als Istwerte bereitgestellt werden, wobei die Istwerte unmittelbar oder aus den Istwerten abgeleitete Kenngrößen mit Sollwerten verglichen werden, und wobei bei Abweichung der Istwerte oder Kenngrößen von den vorgegebenen Sollwerten Prozessparameter für das thermische Spritzen durch einen Regler auf Basis eines neuronalen Netzwerks automatisch angepasst werden.

(Fig. 1)